

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Zproduktivnění elektrodrátového řezání

Reengineering of Electro Discharge Cutting

Student:

Martin Langr

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc

Ostrava 2010

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě19.5.2010.....

.....*Martin Langr*.....
Martin Langr

Adresa trvalého pobytu diplomanta:

Martin Langr
Horní Čermná 228
56156

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě19.5.2010.....

.....Markus Šup.....

podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Langr, M. Zproduktivnění elektrodrátového řezání.: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010, Bakalářská práce, vedoucí Doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Bakalářská práce byla realizována ve firmě Forez s.r.o. Zabývá se porovnáním řezacích drátů Agie cut a Brema na stroji Agie.

V úvodní části práce popisuji technologii a princip elektroerozivního obrábění. V hlavní části se zaměřuji na zhotovení vzorků, zdokumentování výsledků a na následné porovnání obou drátů na vzorcích kotevní desky. Závěrem bakalářské práce je zhodnocení produktivity a návrh řezného drátu pro optimální výrobu.

ANOTATION OF THE BACHELOR THESIS

Langr, M. Reengineering of Eletro Discharge Cutting.: Machining and Fabrication Institute, VŠB Machine Fakulty – Technical University of Ostrava, 2010, Bachelor Thesis, head Doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

The bachelor thesis was realized in a firm Forez s.r.o. The bachelor thesis draws a comparison between cutting wire Agie cut and Brema on Agie machine.

Firstly I describe technology and a principle of electroerosion cutting. In the main part I focus on production of samples, documentation of the results and on follow-up comparison of both wires on anchor plate samples. Finally there is an evaluation of productivity and a cutting wire proposal for optimal production.

Obsah

1.	Úvod.....	6
2.	Obecná charakteristika daného problému.....	7
2.1	Historie a údaje společnosti.....	7
3.	Elektroerozivní obrábění.....	9
3.1	Princip a fyzikální pochod úběru materiálu.....	9
3.2	Charakteristika výbojů.....	11
3.3	Dielektrikum.....	13
3.4	Nástrojové elektrody.....	17
3.5	Technologické aplikace elektroerozivního obrábění.....	19
3.5.1	Hloubení dutin zápusťek a forem.....	19
3.5.2	Výroba složitých tvarových povrchů	20
3.5.3	Řezání drátovou elektrodou	21
3.5.4	Leštění povrchů.....	23
3.5.5	Výroba mikrootvorů.....	23
3.5.6	Elektrokontaktní obrábění.....	24
4.	Návrh vlastního řešení.....	26
4.1	Použité dráty.....	26
4.2	Stroj.....	27
4.3	Materiál kotevní desky.....	28
4.4	Zhotovení kotevní desky.....	28
5.	Diskuse experimentu.....	30
5.1	Řezání drátem Brema.....	30
5.1.1	Výpočet spotřeby a ceny drátu Brema.....	32
5.2	Řezání drátem Agie cut.....	33
5.2.1	Výpočet spotřeby a ceny drátu Agie cut.....	34
6.	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	35
7.	Závěr.....	36
8.	Seznam použitých zkratk.....	37
9.	Seznam použité literatury	39
10.	Seznam příloh.....	41

1. Úvod

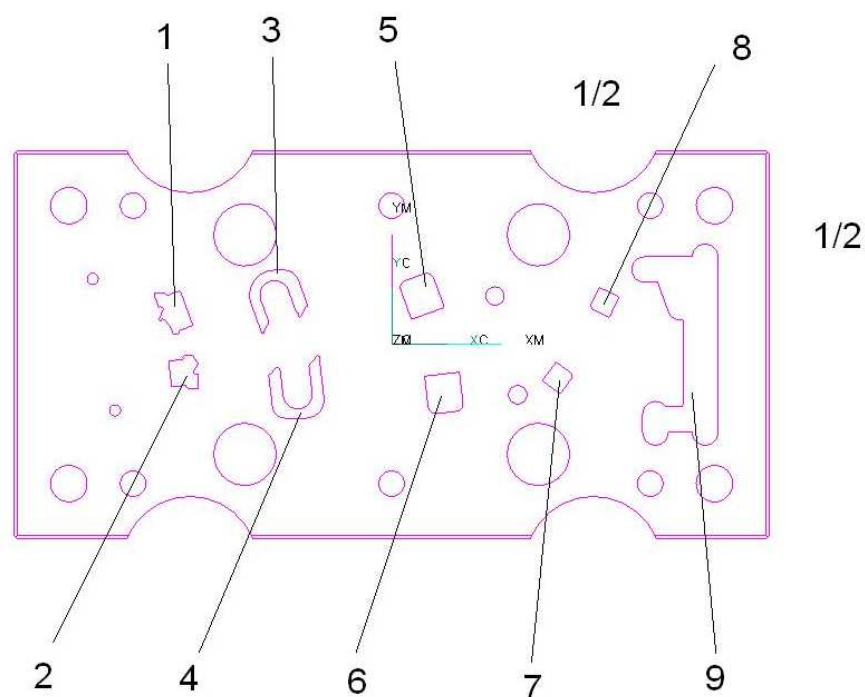
Strojírenství je průmyslový obor, zabývající se navrhováním, výrobou a údržbou strojů. V posledních letech je ve strojírenství kladen největší důraz na kvalitu a přesnost výrobků, na snižování výrobních časů a co nejmenší výrobní náklady.

Nově se používají materiály, jejichž předností jsou především mechanické vlastnosti, jako je například obrobitelnost, pevnost, tvrdost, atd. Proto se také zavádějí nové metody v obrábění. Elektroerozivní obrábění je jedna z moderních, nekonvenčních metod, které se v nedávné době začaly používat.

Využijeme ho především pro výrobu střížných nástrojů a forem, nebo v automobilovém průmyslu, letectví, zbrojním průmyslu, zámečnictví a podobně. Je důležité zvolit vhodnou technologii výroby, obráběcí stroj, nástroje a materiál. Pak dosáhneme požadované efektivity a produktivita práce bude na vysoké úrovni.

2. Obecná charakteristika daného problému

Bakalářská práce je zhotovena pro firmu FOREZ s.r.o. Hlavním úkolem je porovnání dvou drátů Agie cut Ø 0,2 mm a Brema CuZn37 Ø 0,25 mm na drátové řezačce Agiecut Progress V4. Vzorčky kotevní desky pro střížný nástroj jsou řezány oběma dráty při různých podmínkách a následně jsou vyhodnoceny jejich řezné vlastnosti a ekonomické zhodnocení.



Obr. 1: vzorek kotevní desky

2.1 Historie a údaje společnost FOREZ s.r.o

Společnost FOREZ s.r.o se nachází v Ostrově u Lanškrouna. Byla založena v roce 1996 a dnes patří se 192 zaměstnanci mezi nástrojárny střední velikosti. Je však schopna konkurovat i největším nástrojárnám v České republice.

Firma je technologicky velmi dobře vybavena. Strojní park se skládá z několika špičkových HSC, CNC fréz, nejmodernějších elektroerozivních drátových řezaček AGIE Cut, elektroerozivní hloubící stroje AGIE a mnoho dalších strojů pro kvalitní výrobu. Konstrukční a technologické oddělení je vybaveno 3D CAD/CAM systémem Unigraphics 19.0

Firma vyrábí:

- Střížné, ohybové, kombinované a tažné nástroje do max. délky 2000 mm
- Formy na vstřikování plastů do hmotnosti 5000 kg
- Lisované kovové díly
- Plastové výlisky
- Prototypové nástroje a formy
- Přesné náhradní díly dle požadavku zákazníka

Firma FOREZ s.r.o., velice dbá na kvalitu výrobku a veškeré formy a nástroje jsou před uvedením do výroby testovány.

Firma vlastní tyto certifikáty:

- ČSN EN ISO 9001:2008
- ČSN EN ISO 14001:2005
- ISO/TS 16949:2002

Záměrem firmy je pokrýt v budoucnu co největší část výrobního cyklu subdodavatelů pro automobilový a elektrod-technický průmysl. Firmě se daří držet meziroční růst obrátu v rozmezí 20-40%

3. Elektroerozivní obrábění

Elektroeroze, je jednou z nekonvenčních moderních metod obrábění. Využíváme ji při opracování měkkých, tvrdých i kalených vodivých materiálů. Ve většině případů se jedná o bezsilové působení na obráběný materiál, při kterém nevznikají třísky, jako u klasického třískového obrábění.

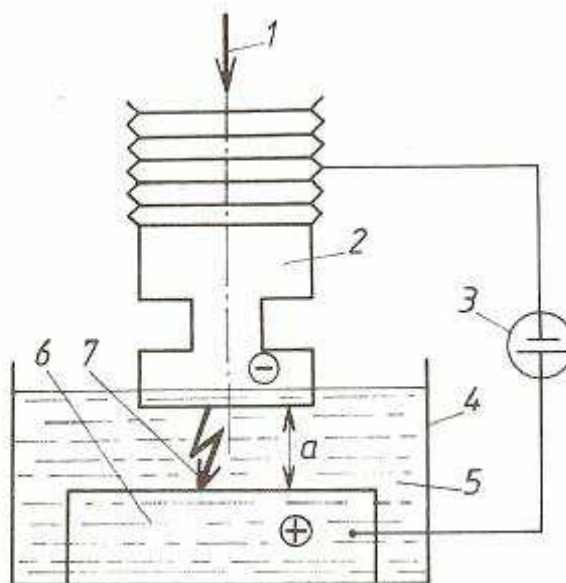
Principem elektroerozivního obrábění je oddělování materiálu pomocí elektrického výboje mezi drátem a obráběnou součástí se schopností oddělit vodivý materiál s přesností na tisíce milimetru. Takto lze vytvořit vnější křivky i otvory různých tvarů, drážky atd.

Toto obrábění můžeme s výhodou použít pro součásti určené na střížné nástroje, formy a náhradní díly ke strojům. Takto lze vytvořit vnější křivky i otvory různých tvarů, drážky atd.

3.1 Princip a fyzikální pochod úběru materiálu

Metoda elektroerozivního obrábění vodivých materiálů je založena na využití tepelné energie, na kterou se přemění elektrické výboje vznikající mezi katodou (nástrojovou elektrodou) a anodou (obrobek) ponořenými do kapaliny s vysokým elektrickým odporem (dielektrika) [obr. 2]. Materiál vlivem vysoké koncentrace energie ($10^5 - 10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$), taje a odpařuje se.

- 1) směr posuvu nástrojové elektrody
- 2) nástrojová elektroda
- 3) generátor
- 4) pracovní vana
- 5) tekuté dielektrikum
- 6) obrobek
- 7) elektrický výboj



Obr. 2: princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [1]

Hlavní zákonitosti elektroeroze: [1]

- podléhají jim všechny elektricky vodivé materiály
- může působit v kapalném i plynném prostředí
- Vhodným zapojením a volbou pracovních parametrů elektrického obvodu lze dosáhnout dvou druhů výbojů:
 - oblouk tj. stacionární výboj
 - jiskra tj. nestacionární výboj

Fyzikální pochod úběru materiálu: [1]

- obrábění probíhá mezi dvěma elektrodami
- elektrody jsou ponořeny do dielektrika
- výboj vznikne přivedením elektrického napětí na elektrody; intenzita jeho působení závisí na:
 - elektrických parametrech výboje
 - vzdálenosti mezi elektrodami
 - znečištění dielektrika
 - vodivosti dielektrika
- K výboji dochází v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole poté, co pohyb volných záporných a kladných iontů v elektrickém poli dosáhne postupně vysoké rychlosti a po překonání odporu dielektrika dojde k vytvoření vodivého (ionizovaného) kanálu mezi elektrodami, tzv. výbojového kanálu.
- V místě výboje vzniká teplota 3000 až 12000 °C, dochází k tání a odpařování materiálu elektrod. Současně se vypařuje dielektrikum, vznikají bubliny, které praskají a vzniklé dynamické síly odebírají v místě výboje z obrobku částičky materiálu.
- Přerušením (vypnutím) elektrického obvodu dojde ke snížení teploty, poklesu tlaku plynů a roztavený materiál je odstraněn z místa výboje, vznikne kráter, jehož objem je řádově 10^{-3} až 10^{-5} mm^3

- Zaniká výboj i bublina, do vzniklého kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje roztavený materiál i elektrody (odebíraný materiál zůstává v dielektriku ve formě spalin a mikročástic).

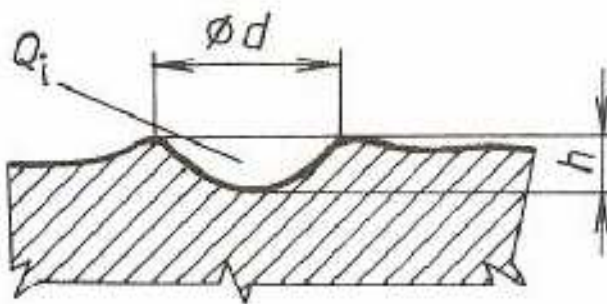
Celkové množství materiálu odebraného výbojem se rozloží na úběr na anodě a úběr na katodě. Cílem procesu je dosáhnout opakovanými výboji na elektrodě, kterou tvoří nástroj, minimálního opotřebení (tj. úběru), a to při požadované produktivitě, tvarové přesnosti a jakosti opracované plochy. [1]

Process lze ovlivnit:

- Způsobem dodání energie (polaritou)
- Vhodnými elektrickými parametry výboje
- Volbou materiálu dané elektrody
- Volbou vhodného dielektrika

3.2 Charakteristika výbojů

Tvar a velikost kráteru vzniklého výbojem (obr. 3) závisí na době trvání výboje a na jeho energii. Pro praktické využití elektroerozivních výbojů je důležitá velikost energie a vysoká frekvence výboje. Čím větší úběr materiálu bude, tím bude větší drsnost a menší přesnost povrchu obrobku.



Obr. 3: Tvar kráteru vzniklého elektrickým výbojem [1]

Množství materiálu odebraného jedním výbojem I: [1]

$$I = k \cdot V_e \text{ (mm}^3\text{)} \quad V_e = U_e \cdot I_e \cdot t_i \text{ (J)}$$

Kde: V_e - je energie výboje,

k - součinitel úměrnosti pro katodu a anodu

U_e - střední napájecí napětí

I_e - střední napájecí proud

t_i - trvání pulzu

Celkové množství vyeroďovaného materiálu $O_{a,c}$, za jednotku času je dáno součtem objemů na katodě a anodě:

$$O_{a,c} = \sum O_{a-c} \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

V závislosti na přiváděné energii jednotlivých výbojů W_l platí:

$$O_a = \sum n \cdot k_a \cdot \eta_d \cdot W_l \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$O_c = \sum n \cdot k_c \cdot \eta_d \cdot W_l \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

k_a, k_c - jsou součinitelé závislé na materiálu elektrod, druhu a způsobu přivádění kapalného dielektrika

η_d - účinnost elektrického výboje

n - počet impulzů za časovou jednotku [s^{-1}] [2]

Podle časového průběhu dodání energie do místa výboje, se elektrické výboje dělí a jsou charakterizovány takto: [1]

<i>Druh výboje</i>	<i>elektrickou jiskrou</i>	<i>Nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem</i>
Trvání pulzu	krátké $t_i = 10^{-4} \text{ s až } 10^{-6} \text{ s}$	delší $t_i > 10^{-4} \text{ s}$
Časové využití periody výboje	malé hodnoty $q = 0,03 \text{ až } 0,2$	vyšší hodnoty $q = 0,2 \text{ až } 1$
Frekvence výbojů	vysoká	nižší
Hustota proudu v místě výboje	Asi 10^6 A.mm^{-2}	10^2 A.mm^{-2} 10^3 A.mm^{-2}
Ve výbojovém kanále převládá	elektronová vodivost	iontová vodivost
Teplota ve výbojovém kanále	vysoká až $12\,000 \text{ °C}$	Nižší $3\,300 \text{ °C až } 3\,600 \text{ °C}$
Energie jednotlivých výbojů	nižší $W_e = 10^{-5} \text{ J až } 10^{-1} \text{ J}$	vyšší $W_e = 10^2 \text{ J}$
Používá se pro	menší úběry tj. pro dokončovací operace	větší úběry, tj. pro hrubovací operace

3.3 Dielektrikum

Dielektrikum má veliký vliv na elektroerozivní obrábění. Působí totiž jako izolátor mezi elektrodami a ohraničuje místo výboje (tzv. výbojový kanál). Slouží k odvodu tepla a odebraného materiálu z pracovního prostředí. Dále zabraňuje usazování odebraného materiálu na nástrojové elektrody.

Za dielektrikum se považují kapaliny s vysokým elektrickým odporem, jako je například petrolej, strojní olej, transformátorový olej, dionizovaná voda destilovaná voda a speciální dielektrika.

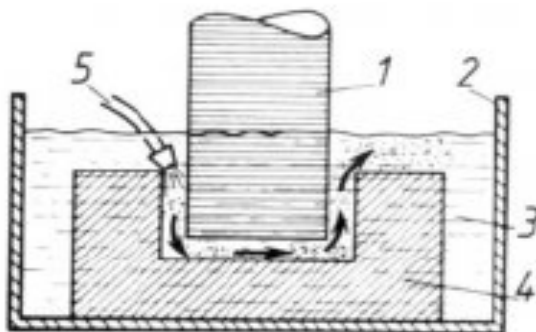
Požadavky na vlastnosti dielektrika: [1]

- Dostatečný elektrický odpor, aby průrazem dielektrika vznikl výboj
- Vhodná viskozita a dobra smáčivost, zajišťující rychlé obnovení izolace v místě výboje
- Přijatelný bod vzplanutí (nemá být nižší než 60°)
- Hygienická a ekologická nezávadnost
- Nízká cena

Dielektrikum je z pracovního prostoru odváděno do zařízení, v němž se ochlazuje a čistí od nečistot vzniklých při obrábění. Toto zařízení má také za úkol přivádět dielektrikum do pracovního prostoru pod stálým tlakem a v požadovaném množství.

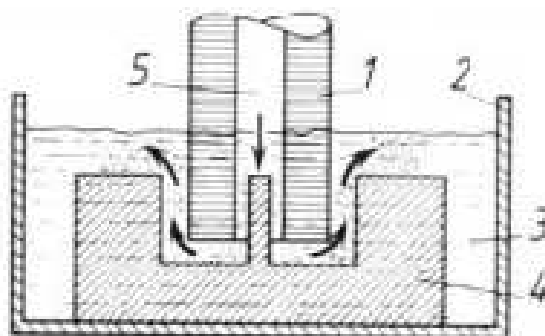
Druhy přívodů dielektrika neboli vyplachování, mezi nástrojovou elektrodou a obrobek:

- **Vnější vyplachování** (Obr. 4) - používá se nejčastěji při obrábění dutin o větší hloubce. Vhodná je kombinace s pulzním vyplachováním



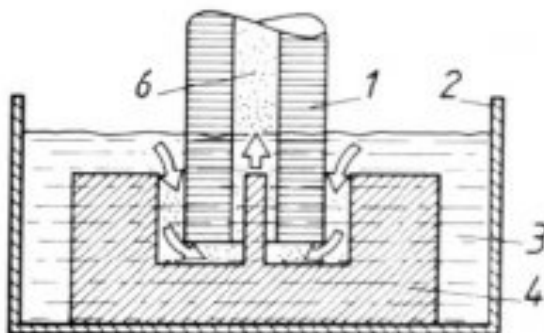
Obr.4 : vnější vyplachování [1]

- **Vnitřní tlakové vyplachování** (Obr. 5) – Dielektrikum je přiváděno do pracovního prostoru otvorem v nástrojové elektrodě. Odváděné částice odebraného materiálu způsobují nežádoucí výboje na bocích dutiny. To se projeví zejména na tvarové přesnosti.

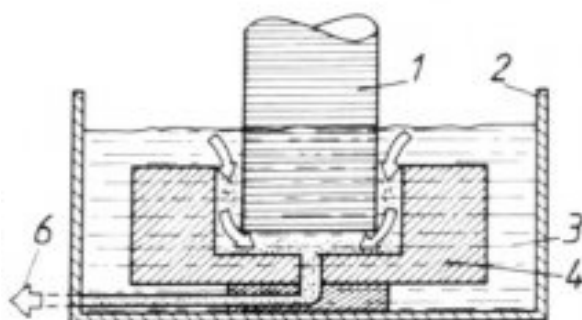


Obr. 5: vnitřní tlakové vyplachování [1]

- **Vyplachování odsáváním** (Obr. 6a a 6b) – Odsávání bývá realizováno dutinou v nástrojové elektrodě nebo v obrobku. Tímto způsobem lze dosáhnout velmi dobré tvarové přesnosti obrobku.

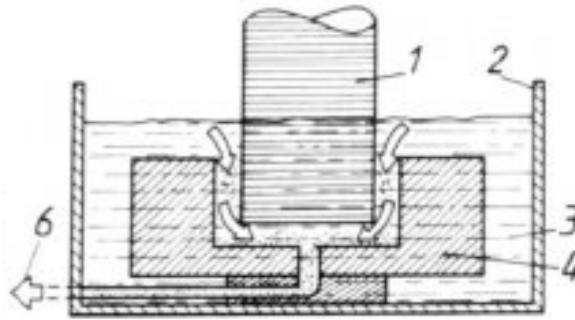


Obr. 6a: vyplachování odsáváním dutinou v elektrodě [1]



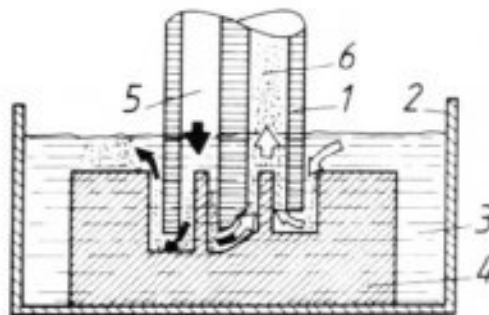
Obr. 6b: vyplachování odsáváním dutinou v obrobku [1]

- **Pulzní vyplachování** (Obr. 7) – Jedná se o způsob krátkého přerušení procesu elektroeroze (0,15 s až 10 s) oddálením nástrojové elektrody od obrobku. Pulzní vyplachování se používá při výrobě hlubokých dutin, při použití tenkých elektrod nebo při obrábění na čisto.



Obr. 7: pulzní vyplachování [1]

- **Kombinované vyplachování** (Obr. 7) – Jedná se o kombinaci vnitřního tlakového vyplachování a odsávání. Takto lze odstranit chyby tvaru obráběné dutiny. Kombinované vyplachování se využívá zejména při hloubení tvarově složitých dutin.



Obr. 7: kombinované vyplachování [1]

3.4 Nástrojové elektrody

Nástrojové elektrody jsou z technického a ekonomického hlediska velmi důležitou součástí elektroerozivních hloubících strojů. Pro každý případ obrábění se navrhuje a konstruuje jiná nástrojová elektroda. Jelikož náklady na její zhotovení činí asi 50% výrobních nákladů, je nutné velmi dobře zvolit její materiál, způsob výroby a způsob upínání na stroji.

Nástrojové elektrody lze vyrobit z materiálu, které mají: [1]

- dobrou elektrickou vodivost
- dobrou tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu
- vysoký bod tání a bod varu
- odolnost proti elektrické erozi
- vyhovující mechanickou pevnost
- stálost tvarů a malou tepelnou roztažnost
- dobrou obrobiteľnost

jedná se tedy o materiály:

- **kovové** - elektrolytická měď, slitina chromu a mědi, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, mosaz
- **kombinované** – kompozice grafitu a mědi

Materiál pro nástrojové elektrody se volí podle objemového opotřebení elektrody, materiálu obrobku a podle stroje na kterém budeme obrobek obrábět.

Úbytek materiálu elektrod závisí na:

- fyzikálních vlastnostech materiálu elektrody (teplota tání, vodivost, měrné teplo)
- elektrických parametrech výboje
- polaritě generátoru

Při stanovení rozměrů nástrojových elektrod se vychází z: [1]

- požadovaného rozměru dutiny
- velikosti pracovní mezery – je funkcí pracovních parametrů generátoru, volí se z normativů dodávaných výrobcem strojů

- požadované drsnosti obrobeného povrchu – je funkcí pracovních parametrů generátoru a tvarové chyby vzniklé např. při hrubování (dané způsobem vyplachování, tvarem dutiny apod.); při výrobě ostrých rohů je nutná korekce tvaru nástrojové elektrody
- tloušťky narušeného povrchu – má význam pouze při velkých energiích výbojů (obvykle dosahuje hodnot 0,005 mm až 0,01 mm)
- minimální hodnoty M_m , o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru dutiny

Například rozměr hrubovací elektrody na hloubení dutiny kruhového tvaru se určí takto (Obr. 8): [1]

$$d = D - 2(a + R_{\max} + z) = d - 2M_m$$

Kde:

d - průměr nástrojové elektrody

D - požadovaný rozměr dutiny

a - velikost pracovní mezery

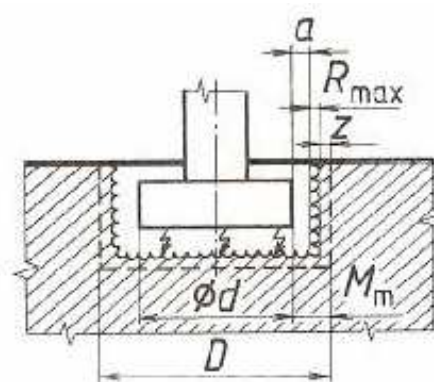
R_{\max} - požadovaná drsnost obrobeného povrchu

z - tloušťka narušeného povrchu

M_m - minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru dutiny

Stanovení rozměru dokončovací elektrody je dáno vztahem:

$$d = D = 2a$$



Obr. 8: Stanovení rozměru hrubovací nástrojové elektrody [1]

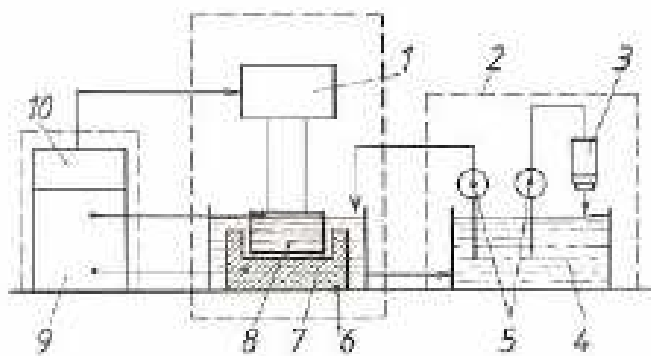
3.5 Technické aplikace elektroerozivního obrábění

Mezi technické aplikace elektroerozivního obrábění patří:

- hloubení dutin zápusťek a forem
- výroba složitých tvarových povrchů
- řezání drátovou elektrodou
- leštění povrchů
- výroba mikrootvorů
- elektrokontaktní obrábění

3.5.1 Hloubení dutin zápusťek a forem

Hloubení se používá zejména při výrobě zápusťek, střížných nástrojů, forem pro lití a lisování plastických hmot. Dnešní hloubicí stroje dosahují přesnosti 0,01 mm a drsnosti Ra 0,8 až 0,4 μm. Všechny činnosti dnešních moderních strojů jsou řízeny systémem CNC. Na některých elektroerozivních strojích pro hloubení dutin, je možný použít až na dobu 48 hodin bezobslužný provoz.



Obr. 9: Schéma elektroerozivního stroje [1]

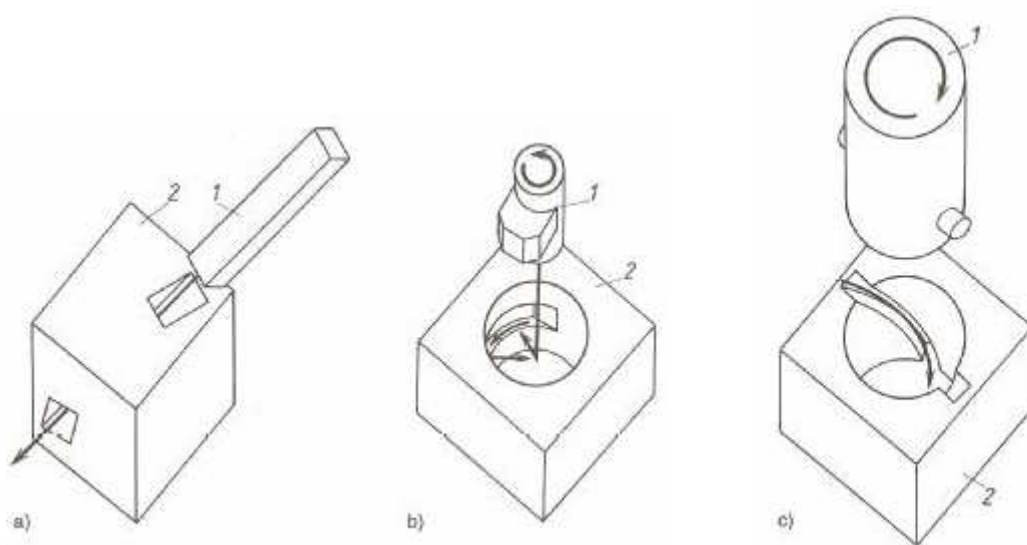
- 1) pracovní hlava, 2) filtrační zařízení, 3) filtr, 4) dielektrikum, 5) čerpadlo, 6) pracovní stůl,
7) obrobek, 8) nástrojová elektroda, 9) generátor, 10) CNC řídicí systém

3.5.2 Výroba složitých tvarových povrchů

Na výrobu složitých tvarových povrchů se používá jiné provedení nástrojové elektrody než o hloubení dutin zápustek a forem. Nástrojové elektrody mají tvar obráběného povrchu. Tímto způsobem se obrábí převážně průchozí díry, drážky a vnější tvar obrobku. Použitím stroje s CNC řídicím systémem s více řídicími osami, lze například získat planetový pohyb.

Obr.10 : Výroba povrchů kombinací tvaru a pohybů nástrojové elektrody [1]

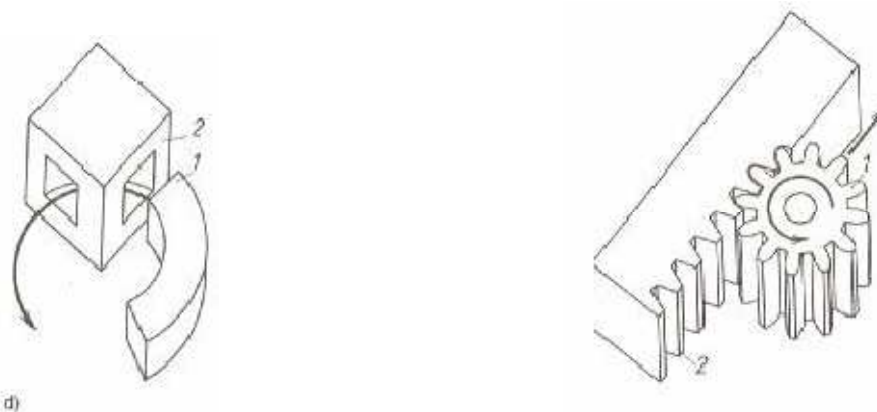
1 – nástrojová elektroda, 2 – obrobek



a) průchozí nekruhová díra

b) uzavřená drážka

c) drážka ve šroubovici



d) díra tvaru části kruhového oblouku

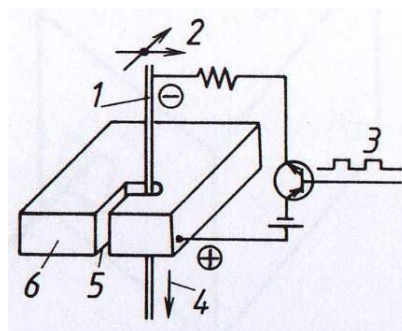
e) ozubený hřeben

3.5.3 Řezání drátovou elektrodou

Řezáním drátovou elektrodou se vyrábí tvarové přímkové plochy. Znamená to, že tvořící čarou těchto ploch je přímka.

Obr. 11 : Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou [1]

- 1) drátová elektroda,
- 2) CNC řídicí systém,
- 3) generátor,
- 4) směr posuvu elektrody,
- 5) vyřezaná drážka,
- 6) obrobek



Nástrojová elektroda je tvořena tenkým drátem, který se pomocí speciálního zařízení odvíjí, aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebení. Drát je většinou měděný, na větší průměry se používá mosazný a na velmi jemné řezy se používá molybdenový drát o průměru 0,03 mm až 0,07 mm. Mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem vznikají elektrické výboje. Pracovní mezera mezi obrobkem a elektrodou se vytváří samočinně úběrem materiálu obrobku před elektrodou. Nástrojová elektroda tvořená drátem je nástroj, který může odebírat materiál v každém směru, což umožňuje ve spojení se šesti osami souřadnic řízenými CNC řídicím systémem obrábět přesně i velmi složité tvary. Způsob zapojení nástrojové elektrody a obrobku do elektrického obvodu je dán polaritou a typem výbojů. U moderních strojů s tranzistorovými generátory pulzů se používá tzv. přímá polarita, tj. nástrojová elektroda jako katoda a obrobek jako anoda. [1]

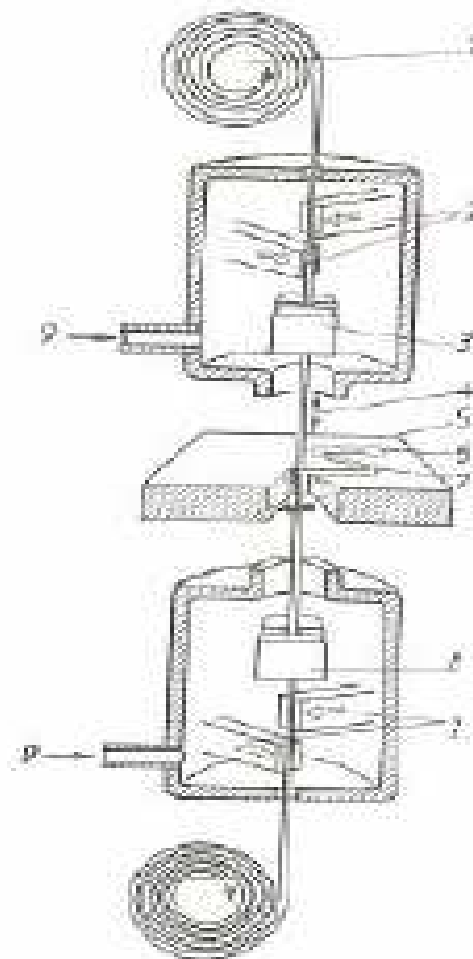
Drátová elektroda musí mít:

- vysokou elektrickou vodivost
- dostatečnou mechanickou pevnost
- vysokou tvarovou přesnost (kruhovitost)
- vysokou přesnost rozměru drátu (malé tolerance průměru)

Nástrojová elektroda musí vstupovat do místa řezu naprosto vyrovnaná a napnutá, k čemuž slouží podavač. V podavači se drát kalibruje pomocí diamantového průvlatku.

Obr. 10: Schéma podávání a vedení drátové elektrody

- 1) zásobník drátu
- 2) přívod výbojového proudu
- 3) horní vedení drátu
- 4) napínání drát
- 5) obrobek
- 6) startovací díra
- 7) řezaný tvar,
- 8) dolní vedení drátu
- 9) přívod dielektrika



Dosahované technologické parametry při elektroerozivním řezání drátovou elektrodou: [1]

- maximální úběr materiálu $35 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ až $200 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$
- rovnoběžnost řezu do $2 \text{ } \mu\text{m}$ na 100 mm tloušťky materiálu
- jakost obrobeného povrchu $R_a = 0,15 \text{ } \mu\text{m}$ až $0,3 \text{ } \mu\text{m}$
- přesnost rozměrů a tvaru povrchu závisí na tepelné stabilizaci stroje:
 - při kolísání teploty $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ je přesnost $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$
 - při kolísání teploty $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ je odchylka $\pm 1 \text{ } \mu\text{m}$
- maximální tloušťka řezaného materiálu 350 mm

Dosahované parametry při řezání tvarovou drátovou elektrodou: [1]

- přesnost obrobených rozměrů 0,1 mm
- jakost obrobeného povrchu $R_a = 10 \mu\text{m}$
- rychlost posuvného pohybu
- nástrojové elektrody 0,17 mm. min⁻¹ až 0,55 mm. min⁻¹
- výhodné pro obrábění dutin o délce větší než 70 mm

3.5.4 Leštění povrchů

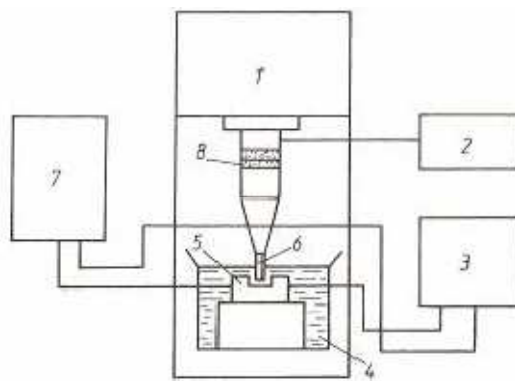
Elektroerozivní leštění se používá zejména při výrobě forem a zápusťek, kde je požadovaná drsnost obrobeného povrchu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Tato metoda je založena na principu pulzů o nízké energii a velmi malé době trvání (3 až 5 μs). Používají se zde nástrojové elektrody s leštěným povrchem, které při práci konají orbitální pohyb. Pro získání lesklého povrchu se leští plocha do 100 cm².

3.5.5 Výroba mikrootvorů

Jedná se o vrtání malých otvorů o rozměrech 0,02 až 5 mm a hloubkou do 100 mm. Abychom mohli takto malé otvory vyvrtat, musíme použít speciálních strojů, které mají vhodné technologické parametry pro mikroděrování. Tyto stroje jsou vybaveny optickým zařízením pro polohování elektrody a mají přípravek pro vedení nástroje, jenž může být ve formě sklené kapiláry. Nástrojové elektrody se volí wolframové nebo tungstenové a konají kmitavý pohyb pro zajištění dobrého vyplachování dielektrika. Používají se tedy generátory s pulzy o malé energii a krátké době trvání (3 až 5 μs).

Dosahované parametry: [1]

- přesnost otvoru je závislá na přesnosti nástrojové elektrody a na přesnosti stroje
- jakost opracovaného povrchu $R_a = 0,08 \mu\text{m}$ až 0,5 μm



Obr. 11: Schéma stroje pro výrobu mikrootvorů elektroerozivní technologií [1]

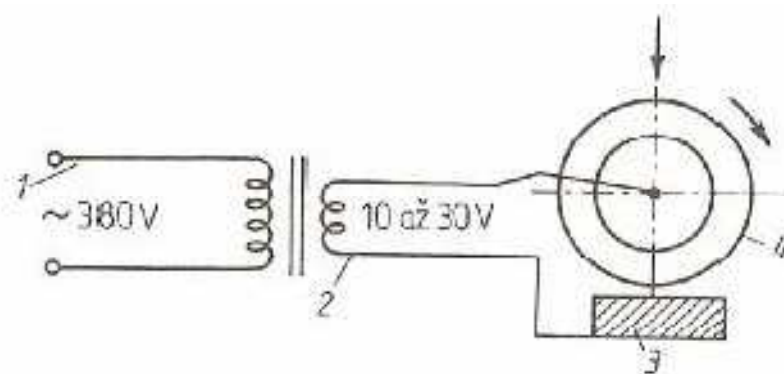
1) elektroerozivní stroj, 2) ultrazvukový generátor, 3) řídicí systém stroje, 4)

dielektrikum, 5) obrobek, 6) nástrojová elektroda,

7) generátor pulzů 8) převodník elektrických kmitů na mechanické kmity

3.5.6 elektrokontaktní obrábění

Při elektrokontaktním obrábění dochází k úběru materiálu elektrickými nestacionárními kontaktními obloukovými výboji. Ve výbojovém kanálu je iontová vodivost, která zde převládá. Elektrody jsou zapojeny do zdroje střídavého napětí a transformátor musí mít výkon 10 až 250 kW při frekvenci 50 až 500 Hz. Doba výboje pak trvá až 0,01 s. K zabránění svaření nástroje a obrobku a k dosažení mechanického buzení kmitů musí nástrojové elektrody konat otáčivý pohyb. Na nástrojových elektrodách jsou drážky, které slouží k lepšímu výplachu dielektrika.



Obr.12: Princip stroje pro elektrokontaktní dělení materiálů [1]

1) napájecí zdroj, 2) transformátor, 3) obrobek, 4) nástrojová elektroda

Dosahované parametry: [1]

- výkon obrábění až 106 mm³. min⁻¹
(tj. množství odebraného materiálu) 100 kg. h⁻¹ až 500 kg. h⁻¹
- tepelné ovlivnění obrobeného povrchu
do hloubky 0,2 mm až 5 mm
- velká energetická náročnost řádově kW. h⁻¹. kg⁻¹
- vznik ultrafialového záření
- nízká kvalita obrobeného povrchu

Elektrokontaktní obrábění je vhodné pro řezání nálitků, vtoků, opracování svarů apod.

4. Návrh vlastního řešení

Na stroji AGIECUT PROGRESS V4 jsme upnuli dílec kotevní desky pro střížný nástroj a do softwaru AGIEVISION AGIECUT EVOLUTION CUT 03.03.01 jsme zadali postupně 9 programů ke zhotovení požadovaných otvorů. Dílec kotevní desky jsme nejprve obráběli drátem značky BREMA o průměru 0,25 mm. Po obrobení tímto drátem jsme na stroj upnuli nový dílec kotevní desky a tentokrát jsme k jeho zhotovení použili drát značky AGIECUT o průměru 0,2 mm. Nesmíme zapomenout, že veškeré dosažené parametry při obou řezání je zapotřebí řádně zdokumentovat.

Nejdůležitější však bylo následné porovnání dosažených parametrů a vyhodnocení, kterým drátem je produktivnější tento dílec obrábět.

4.1 Použité dráty

Ke zhotovení dílce jsem použil dva dráty. Mosazný drát značky BREMA CuZn37 o pevnosti v tahu 900N/mm^2 a $\varnothing 0,25$ mm. Tento drát má díky kvalitnímu metalurgickému složení úvodních materiálů stálou elektrickou vodivost a přesnost požadovaného průměru je $\pm 0,001$. Používá se především na strojích s automatickým navlíkáním drátu.

Jako druhý drát použijeme mosazný drát značky AGIE cut Thermo brass o pevnosti v tahu 900N.mm^{-2} a $\varnothing 0,2$ mm. Tento drát zaručuje geometrickou přesnost a pyšní se vysokou kvalitou řezu.

Oba dráty jsou v provedení na 16 kg cívce pod označením K200.

4.2 Stroj

Pro daný experiment jsem zvolil stroj typu AgieCut Progress V4 (obr. 13). Tento stroj umožňuje řezání materiálu až do výšky 520 mm. Lze na něm výhodně obrábět i zakalené dílce. Na tomto stroji je používán software Agie vision AgieCut evolution cat 03.03.01.

Technické parametry stroje:

- Max. rozměry dílce: 1 300 × 1 000 × 500 mm
(šířka × hloubka × výška)
- Max. hmotnost dílce: 3 000 kg
- Radius: 0,1 mm
- Pojezdy: osy X/Y/Z 800/550/525 mm
osy U/V 800/550
max. úhel náklonu 30°/500 mm



Obr. 13) drátová řezačka AgieCut Progress V4

4.3 Materiál kotevní desky

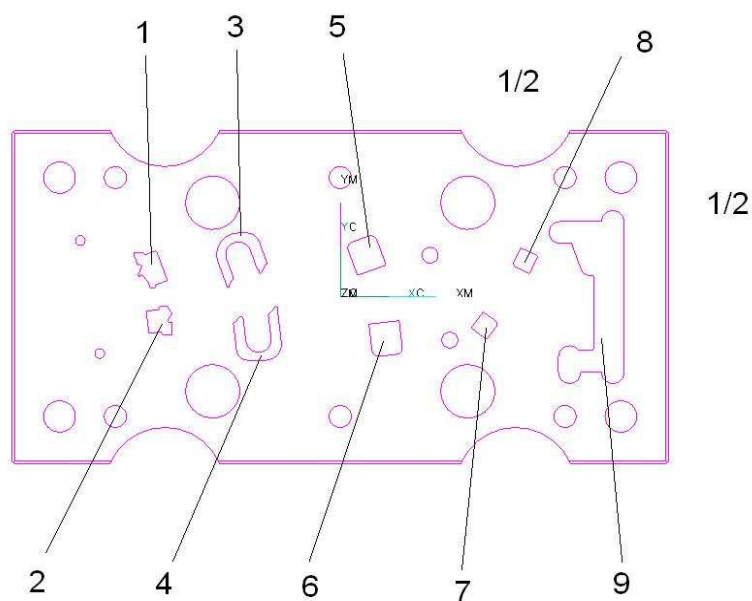
Na kotevní desku byl použit materiál 1.2312. Jedná se o chrom-mangan-molybdenovou ocel. Tato ocel je díky zvýšenému obsahu síry dobře obrobitelná a dobře tvárná za tepla. Má dobrou leštitelnost, dá se kalit, cementovat a lze na ni nanášet tvrdochrom. Používá se zejména pro nástroje a formy ke zpracování umělých hmot. Tuto ocel lze použít na méně náročné nástroje pouze v zušlechtěném stavu na 950 až 1100 N/mm².

Chemické složení v %

C	Mn	Si	Cr	Mo	P max.	S max.
0,35-0,45	1,40-1,60	0,30-0,50	1,80-2,00	0,15-0,25	0,030	0,05-0,1

4.4 Zhotovení vzorků

K mému experimentu mě firma forez s.r.o poskytla před hotovenou kotevní desku ke střížnému nástroji. Jako vzorky tedy volím dvě stejné kotevní desky s rozměry 206x106x18 mm, do kterých jsem vyhotovil devět různých tvarů. Na každou desku byl použit jiný řezací drát a jiné parametry řezání.



Obr. 14) Vzorek kotevní desky



Obr. 15) upnutí vzorku do stroje Agie Progress V4

5. Diskuse experimentu

Pro řezání otvorů do dvou stejných kotevních desek použiji dva druhy drátu s jinými parametry. Každý otvor budu řezat celkem třikrát. První řez, řeže do plného materiálu a je tedy za potřebí větších řezných parametrů. Druhý řez působí jako řez hrubovací a třetím řezem řežu na čisto s menším přídávkem, protože mezi drátem a obrobkem dojde ještě k určitému vypálení materiálu. Je tedy potřeba přesně nastavit řezné parametry pro jednotlivé řezy a dráty. Při špatném zadání parametrů hrozí přerušení obrábění, zastavení stroje a tím i ke snížení produkce. Na konec experimentu porovnám čas řezání, spotřebu drátu a ekonomicky zhodnotím.

Zadané parametry:

V	[mm.s ⁻¹]	rychlost řezání
I	[A]	proud
P	[KW]	výkon
Str	[/]	rohová strategie
Fw	[MPa]	napětí drátu
Aw	[mm.s ⁻¹]	rychlost drátu
P	[Ba]	tlak výplachu
Ofs	[μm]	přídavek na konturu

5.1 Řezání drátem Brema

Při řezání kotevní desky drátem Brema CuZn37 Ø 0,25 mm (obr.16) jsem volil parametry:

	v	I	P	Str	Fw	Aw	P	Ofs
Řez 1	3,25	17	54	133	17	175	12	2245
Řez 2	2,65	4	63	0	20	165	0,4	1466
Řez 3	2,36	1	71	0	20	150	0,3	1329

Při řezání jsme dosahovali časů:

Tvar 1	Tvar 2	Tvar 3	Tvar 4	Tvar 5	Tvar 6	Tvar 7	Tvar 8	Tvar 9
0:43:12	0:36:36	1:20:24	1:23:24	0:42:36	0:42:36	0:26:24	0:26:24	3:09:00

Výsledný celkový čas doby řezání je 9 h 30 min 36 s



Obr. 16) Kotevní deska řezaná drátem Brema Ø 0,25 mm

5.1.1 Výpočet spotřeby a ceny drátu Brema:

Na 16 kg cívice drátu Brema je návin 38400 m.

Celkový čas obrábění kotevní desky je 9 h 30 min 36 s = 34236 s

Průměrná rychlost drátu je $163,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} = 0,1633 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cena drátu za 1kg = 397 Kč

Délka spotřebovaného drátu:

$$s = v \cdot t$$

$$s = 0,1633 \cdot 34236$$

$$s = 5590,74 \text{ m}$$

Hmotnost 1 metru drátu:

$$m_1 = m_c / s_c$$

$$m_1 = 16 / 38400$$

$$m_1 = 41,66 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

Hmotnost spotřebovaného drátu:

$$m_{\text{spotř.}} = s \cdot m_1$$

$$m_{\text{spotř.}} = 5590,74 \cdot 41,66 \cdot 10^{-5}$$

$$m_{\text{spotř.}} = 2,3295 \text{ kg}$$

Cena spotřebovaného drátu:

$$N_{\text{spotř.}} = m_{\text{spotř.}} \cdot N_1$$

$$N_{\text{spotř.}} = 2,3295 \cdot 252$$

$$N_{\text{spotř.}} = 587,02 \text{ Kč}$$

Při obrábění kotevní desky drátem Brema Ø 0,25 mm jsem zjistil, že daná spotřeba činí 2,3295 kg drátu v ceně 587,02 Kč.

5.2 Řezání drátem Agie cut

Při řezání kotevní desky drátem Agie cut Ø 0,2 mm (obr. 17) jsem volil parametry:

	v	I	P	Str	Fw	Aw	P	Ofs
Řez 1	2,49	15	54	133	13	180	12	1917
Řez 2	2,65	4	63	0	15	165	0,4	1216
Řez 3	2,36	1	71	0	15	150	0,3	1079

Při řezání jsem dosahovali časů:

Tvar 1	Tvar 2	Tvar 3	Tvar 4	Tvar 5	Tvar 6	Tvar 7	Tvar 8	Tvar 9
0:46:48	0:39:36	1:27:00	1:30:36	0:46:12	0:46:12	0:28:48	0:28:12	3:25:12

Výsledný celkový čas doby řezání je 10 h 28 min 36 s



Obr. 17) kotevní deska řezaná drátem Agie cut Ø 0,2mm

5.2.1 Výpočet spotřeby a ceny drátu Agie cut:

Na 16 kg cívice drátu Agie cut je návin 59800 m.

Celkový čas obrábění kotevní desky je 10 h 28 min 36 s = 37716 s

Průměrná rychlost drátu je $165 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} = 0,165 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cena drátu za 1kg = 397 Kč

Délka spotřebovaného drátu:

$$s = v \cdot t$$

$$s = 0,165 \cdot 37716$$

$$s = 6223,14 \text{ m}$$

Váha 1 metru drátu:

$$m_1 = m_c / s_c$$

$$m_1 = 16 / 59800$$

$$m_1 = 26,7558 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

Váha spotřebovaného drátu:

$$m_{\text{spotř.}} = s \cdot m_1$$

$$m_{\text{spotř.}} = 6223,14 \cdot 26,7558 \cdot 10^{-5}$$

$$m_{\text{spotř.}} = 1,6650 \text{ kg}$$

Cena spotřebovaného drátu:

$$N_{\text{spotř.}} = m_{\text{spotř.}} \cdot N_1$$

$$N_{\text{spotř.}} = 1,6650 \cdot 397$$

$$N_{\text{spotř.}} = 661,03 \text{ Kč}$$

Při obrábění kotevní desky drátem Agie cut Ø 0,2 mm jsem zjistil, že daná spotřeba činí 1,6650 kg drátu v ceně 661,03 Kč.

6. Technicko-ekonomické zhodnocení

Po dokončení výrobní části a po přepočítání potřebných výpočtů jsem došel k následujícímu zhodnocení experimentu.

K řezání devíti otvorů na kotevní desce jsem nejprve zvolil drát Agie Cut Ø 0,2 mm. Jedná se o drát, jehož spotřeba byla při zadaných parametrech 1,665 kg. Cena tohoto množství drátu vyjde na 661 Kč. Při parametrech, určených k řezání drátem Ø 0,2 mm dosáhneme času 10 h 28 min 36 s.

Na druhý vzorek jsem použil řezací drát Brema Ø 0,25 mm. Při použití tohoto drátu, je možné nastavit větší parametry řezání. Dosáhne se tedy kratších časů a to 9 h 30 min 36 s. Spotřeba drátu za těchto podmínek byla 2,3295 kg. Podle ceníku materiálu pro firmu Forez s.r.o stojí spotřebovaný drát Brema Ø 0,25 mm 587 Kč.

Při porovnání obou drátů jsem došel k závěru, že na spotřebovaném materiálu je firma Forez s.r.o schopna při použití drátu Brema Ø 0,25 mm ušetřit 74 Kč. Dále je řezání drátem Brema o 58 minut rychlejší než řezání drátem Agie Cut a při sazbě 800 Kč za hodinu ušetří firma 773,30 Kč za provoz. Po sečtení částek za drát a za provoz dojdeme ke zhodnocení, že drátem Brema ušetří firma Forez s.r.o na dílci kotevní desky 847,30 Kč.

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce, na téma Zproduktivnění elektrodrátového řezání bylo, porovnání dvou různých řezacích drátů značky Agie a Brema na stroji agie ve firmě Forez s.r.o. Jednalo se v ní zejména o spotřebu řezacích drátů a úspory času při řezání.

Úvodní část této bakalářské práce jsem se zaměřil na elektroerozivní obrábění. Je zde popsána technologie a principy elektroerozivního obrábění. Další část byla zaměřena na vyhotovení vzorků kotevní desky, zdokumentování výsledků a jejich porovnání. Na závěr jsem se věnoval zhodnocení produktivity a návrhu řezného drátu pro optimální výrobu.

Zjistil jsem tedy, že při řezání drátem Brema Ø 0,25 mm dosáhneme úspory řezacího drátu a také výraznému zkrácení výrobního času kotevní desky pro střižný nástroj.

8. Seznam použitých zkratek:

a	velikost pracovní mezery	[mm]
A_w	rychlost drátu	[mm. s ⁻¹]
D	požadovaný rozměr dutiny	[mm]
d	průměr nástrojové elektrody	[mm]
F_w	napětí drátu	[MPa]
I	proud	[A]
I_e	střední napájecí proud	[A]
k	součinitel úměrnosti pro katodu a anodu	[/]
k_a, k_c	součinitelé závislé na materiálu elektrod	[/]
m_1	hmotnost 1 m drátu	[kg]
m_c	hmotnost cívky	[kg]
Mm	minimální hodnota pro požadovaný průměr dutiny	[mm]
$m_{spotř.}$	hmotnost spotřebovaného drátu	[kg]
n	počet impulzů za časovou jednotku	[s ⁻¹]
N_1	cena za 1 kg drátu	[Kč]
$N_{spotř.}$	cena spotřebovaného drátu	[Kč]
$O_{a,c}$	Celkové množství vyeroďovaného materiálu	[mm ³ .s ⁻¹]
Ofs	přídavek na konturu	[μm]
P	tlak výplachu	(Ba)
P	výkon	[KW]
Ra	jakost obroběného povrchu	[μm]
Rmax	požadovaná drsnost obroběného povrchu	[μm]
s	délka spotřebovaného drátu	[m]
s_c	délka drátu na cívce	[m]
Str	rohová strategie	[μm]
t	doba řezání	[s]
t_i	trvání pulzu	[s]
U_e	střední napájecí napětí	[V]
v	průměrná rychlost drátu	[mm. s ⁻¹]
V	rychlost řezání	[mm.s ⁻¹]
V_e	je energie výboje	[J]

W_l	závislost energie jednotlivých výbojů	[/]
z	tloušťka narušeného povrchu	[mm]
η_d	účinnost elektrického výboje	[/]

9. Seznam použité literatury

- [1] ŘASA, Jaroslav; POKORNÝ, Přemysl; GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3–2.díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. Pedagogické nakladatelství Scientia, spol. s.r.o., Praha 6 – Břevnov, Radimova 37/50, 169 00, 2005, 2. vydání.
- [2] Brychta, Josef. *Obrábění I. Návod do cvičení 2. Část. Katedra obrábění a montáže*. Editační středisko VŠB-TU Ostrava, 2004, 2. vydání, ISBN-80-248-0577-4
- [3] MÁDL, Jan; KAFKA, Jindřich; VRABEC, Martin; DVOŘÁK, Rudolf. *Technologie obrábění – 3. díl*, ČVUT v Praze, 2000, ISBN 80-01-02091-6.
- [4] DRÁB, Vojtěch a kolektiv. *Technologie I. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, fakulta strojní, katedra obráběcích strojů a díl. měření*, v červnu 1979, 1. vydání.
- [5] ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; Čep, Robert. *Top trendy v obrábění, 2.část – Nástrojové materiály*. Žilina: Media/ST, s.r.o Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7
- [6] VINGER, M.; PŘIKRYL, Z. a kolektiv. *Obrábění*. Státní nakladatelství technické literatury, n.p., Praha 1, Spálená 51, 1984, 800 s. 04-250-84.
- [7] Forez s.r.o. Poslední aktualizace 6.3.2010, [cit.6-3-2010].
URL: <<http://www.forez.cz/page.php?a=historie&i=historie&l=cz>>.
- [8] MM Průmyslové spektrum. Poslední aktualizace 8.3.2010, [cit.8-3-2010].
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
- [9] AGIE drátovky. Poslední aktualizace 15.4.2010, [cit.15-4-2010].
URL: <<http://www.agiecharmilles.cz/agiewedm.html#acprg>>.

[10] *Thermocompact*. Poslední aktualizace 3.5.2010, [cit.3-5-2010].

URL: <<http://en.thermocompact.com/Our-Products/Electro-erosion-wires-EDM/Online-catalogue/Thermo-Brass>>.

[11] *Pfingstner*. Poslední aktualizace 3.5.2010, [cit.3-5-2010].

URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.

10. Seznam příloh

Příloha č.1: Výkres kotevní desky – N2244-006

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu technologie ve firmě Forez s.r.o panu Janu Otevřelovi za poskytnutí podkladů a za cenné rady při řešení daného experimentu.

Další poděkování bych chtěl věnovat vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc za odborné vedení a cenné rady při její tvorbě.